Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 4. С. 374–381. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 4, pp. 374–381. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.825.54 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-374-381

Повышение стабильности функционирования рабочего органа в кривошипных прессах*

К. О. Кобзев[1]**

[1]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Increasing stable operation of the working body in crank presses ***

K. O. Kobzev[1]**

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Исследованы статическая и динамическая системы нагружения предохранительной фрикционной муфты (ПФМ). Синтезирована принципиальная схема фрикционного контакта твердых тел в кузнечно-штамповочных машинах. С точки зрения исследования процесса повышения стабильного функционирования рабочего органа в кривошипных прессах рассмотрены следующие факторы: время срабатывания, текущий коэффициент трения и изменение вращающего момента при статическом и динамическом нагружении предохранительной муфты.

Материалы и методы. Определено время срабатывания ПФМ, имеющей дифференцированные пары трения. Искомый показатель соответствует участку рабочего времени, на котором усиливается нагружение (между значениями номинального вращающего момента и момента срабатывания). Параметры системы, состоящей из двух масс, соответствуют параметрам эквивалентной системы, включающей муфту и ключевые части привода. Элементы системы: масса инерции; масса инерции, включающая ротор двигателя и основную (ведущую) часть ПФМ; упругая связь с указанным значением приведенной угловой жесткости.

Результаты исследования. Определены значения нагрузки, возникающей в упругих связях, не обусловленных функционированием рабочих органов. Представлены формулы, которые следует использовать для определения значений движущего момента и обобщенных координат. Описаны условия старта при увеличении значения нагрузки от начальных показателей.

Обсуждение и заключения. Найдена зависимость для вычисления минимального числа пар трения основной фрикционной группы. Показано, что при этом минимуме коэффициент усиления, используемый для реализации «идеальной» нагрузочной характеристики ПФМ, не превышает предельно допустимое значение, даже если величина коэффициента трения максимальна. Представлена принципиальная модель ПФМ, в которой при минимальном значении коэффициента трения отрицательная обратная связь не действует. В принципиальной схеме модернизации

Introduction. Static and dynamic loading systems of the safety friction clutch (SFC) are investigated. A schematic diagram of the frictional contact of solids in the forging and stamping machines is synthesized. From the point of view of increasing the operational stability of the working body in crank presses, the following factors are considered: response time, current friction factor and a change in torque under static and dynamic loading of the safety clutch.

Materials and Methods. The response time of the SFC with differentiated friction pairs is determined. The sought indicator corresponds to the period of the uptime in which the load is amplified (between values of the rated torque and the response time). The parameters of a dual-mass system correspond to the parameters of an equivalent system that includes a clutch and key parts of the drive. The system elements include mass of inertia; mass of inertia including the engine rotor and the main (driving) part of the SFC; elastic connection with the specified value of the reduced angular stiffness.

Research Results. Values of the load arising in elastic bonds not conditioned by the working body operation are specified. Formulas that should be used to determine the values of the driving moment and generalized coordinates are presented. Start conditions with an increase in the load value from the initial indicators are described.

Discussion and Conclusions. The dependence is found for calculating the minimum number of friction pairs of the basic friction group. It is shown that at this minimum, the gain used to implement an “ideal” SFC load characteristic, does not exceed the maximum permissible value, even if the value of the friction coefficient is maximum. A fundamental SFC model is presented, in which, with a minimum value of the friction coefficient, negative feedback does not work. In the functional



*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: 5976765@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

базового варианта ПФМ для повышения точности срабатывания и номинальной нагрузочной способности отсутствует отрицательная обратная связь при минимальном значении коэффициента трения.

diagram of the basic SFC version modernization, there is no negative feedback with a minimum value of the friction coefficient in order to increase the accuracy of operation and the rated load capacity.

Ключевые слова: кривошипный пресс, коэффициент трения, рабочий механизм, коэффициент усиление, перегрузка, точность.

Keywords: crank press, friction coefficient, working mechanism, gain factor, overload, accuracy

Образец для цитирования: Кобзев, К. О. Повышение стабильности функционирования рабочего органа в кривошипных прессах / К. О. Кобзев // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 374−381. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-374-381

For citation: K.O. Kobzev. Increasing stable operation of the working body in crank presses. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 374−381. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-374-381

Введение. На современном этапе развития производства актуально повышение надежности и увеличение срока эксплуатации производственного оборудования. В частности, представляет интерес исследование статической и динамической систем нагружения предохранительной фрикционной муфты. В рамках данной работы исследована статическая и динамическая системы нагружения предохранительной фрикционной муфты. Синтезирована принципиальная схема фрикционного контакта твердых тел в кузнечно-штамповочных машинах. С точки зрения исследования процесса повышения стабильной работы рабочего органа в кривошипных прессах рассмотрены следующие факторы: время срабатывания, текущий коэффициент трения и изменение вращающего момента при статическом и динамическом нагружении предохранительной муфты.

Материалы и методы. Определим время срабатывания предохранительной фрикционной муфты (ПФМ), имеющей дифференцированные пары трения. Искомый показатель соответствует участку рабочего времени, на котором усиливается нагружение, — между значениями $T_н$ (номинальный вращающий момент) и T_i (момент срабатывания). Параметры системы, состоящей из двух масс, соответствуют параметрам эквивалентной системы, включающей муфту и ключевые части привода (рис. 1).

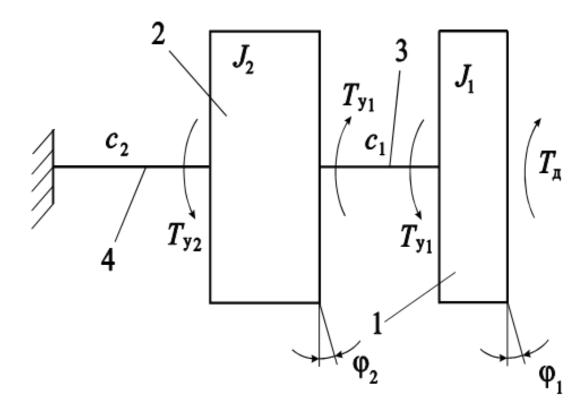


Рис. 1. Расчетная динамическая схема 1

Составные части системы:
— масса инерции (эквивалентная система подведена к основному (ведущему) валу ПФМ (позиция 1 на рис. 1.);
— масса инерции, включающая ротор двигателя и основную (ведущую) часть ПФМ (позиция 2 на рис. 1);
— упругая связь с указанным значением приведенной угловой жесткости c_1 и c_2 соответственно (позиции 3 и 4 на рис. 1).

Установим, что значение демпфирования в этой системе и в ПФМ низкое, и его не следует использовать. Значение приведенного момента сил сопротивления равно $T_н$. Учитывая эти факторы, получаем уравнения движения [1]:

$$J_1\ddot{\phi}_1 + c_1(\phi_1 - \phi_2) = T_д , \quad (1)$$

$$J_2\ddot{\phi}_2 + c_2\phi_2 = c_1(\phi_1 - \phi_2) , \quad (2)$$

где J_1, J_2 — значения приведенных моментов инерции соответственно ПФМ и неосновной (ведомой) части привода; $T_д$ — значение движущего момента; ϕ_1, ϕ_2 — значения обобщенных координат движения системы (значения углов поворота масс инерции соответственно 1 и 2).

Уравнения (1) и (2) показывают, что двигатель обладает необходимым ресурсом значения мощности и $\phi_1 = \omega t$ (ω — значение угловой скорости движения масс инерции 1, $\omega = \mathrm{const}$, t — значение времени) [2–5].

Введем данные условия в уравнение (2):

$$\ddot{\phi}_2 + \frac{c_1 + c_2}{J_2}\phi_2 = \frac{c_1}{J_2}\omega t .$$

В итоге запишем:

$$\phi_2 = A\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + B\cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + \frac{c_1}{c_1 + c_2}\omega t.$$

Значения постоянных интегрирования A и B необходимо вычислять при указании начальных значений: при $t = 0$ $\phi_2 = T_н / c_2$, $\dot{\phi}_2 = \omega$. Тогда

$$B = \frac{T_н}{c_2};\ A = \frac{c_2\omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}} .$$

Отсюда

$$\phi_2 = \frac{c_2\omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + \frac{T_н}{c_2}\cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + \frac{c_1}{c_1 + c_2}\omega t .$$

Значения нагрузок, которые получают упругие связи 3 и 4, равны:

$$T_1 = c_1(\phi_1 - \phi_2) = \frac{c_1c_2\omega t}{c_1 + c_2} - \frac{c_1c_2\omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t - \frac{c_1}{c_2}T_н\cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t , \quad (3)$$

$$T_2 = c_2\phi_2 = \frac{c_1c_2\omega t}{c_1 + c_2} + \frac{c^2{}_2\omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + T_н\cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t , \quad (4)$$

$$\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t = 0,\ \cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t = 1 \text{ или } \sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t = 1,\ \cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t = 0 . \quad (5)$$

Рассмотрим уравнение:

$$\frac{c_1c_2\omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}} = \frac{c_1}{c_2}T_н . \quad (6)$$

Единственное действительное значение решения уравнения (6):

$$c_1 = c_2\left(\sqrt[3]{\frac{c_2J_2\omega^2}{T^2{}_н}} - 1\right). \quad (7)$$

Анализ кубического уравнения

$$c^3{}_1 + 3c^2{}_1c_2 + 3c_1c^2{}_2 + c^3{}_2 - \frac{c^4{}_2J_2\omega^2}{T^2{}_н} = 0$$

позволяет сделать следующее утверждение: при значениях переменных c_1, меньших, чем значение переменной, вычисленной по (6), значение левой части (7) намного больше правой [6–8]. При указанных в (3) тригонометрических функциях с возможным уменьшением c_1 увеличивается значение амплитуды колебаний по синусоиде $\left(c_1c_2\omega\sqrt{J_2/(c_1 + c_2)}/(c_1 + c_2)\right)$ и уменьшается значение амплитуды колебаний по косинусоиде $\left(c_1T_н / c_2\right)$.

$$c_1 < c_2\left(\sqrt[3]{\frac{c_2J_2\omega^2}{T^2{}_н}} - 1\right). \quad (8)$$

Отрезок времени, когда значение момента упругой связи 3 является идентичным $T_п$:

$$t_{\text{с}} = \frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2 \omega}\left(T_{\text{п}} + \frac{c_1}{c_2} T_{\text{н}}\right). \tag{9}$$

Тогда $\sin\sqrt{(c_1+c_2)t_{\text{с}}/J_2} = 0$; $\cos\sqrt{(c_1+c_2)t_{\text{с}}/J_2} = 1$, вследствие чего находим:

$$\sqrt{(c_1+c_2)t_{\text{с}}/J_2} = 2\pi n,$$

где $n = 0, 1, 2, \ldots, n$.

Учитывая (9), запишем:

$$(c_1+c_2)\sqrt{c_1+c_2}\left(T_{\text{п}} + \frac{c_1}{c_2} T_{\text{н}}\right) = 2\pi n J_2 c_1 c_2 \omega. \tag{10}$$

Для жестких ПФМ $\left(c_1 > c_2\left(\sqrt[3]{c_2 J_2 \omega^2 / T^2_{\text{н}}} - 1\right)\right)$ используем выражение $\sin\sqrt{(c_1+c_2)t_{\text{с}}/J_2} = 1$, $\cos\sqrt{(c_1+c_2)t_{\text{с}}/J_2} = 0$. При этом

$$t_{\text{с}} = \frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2 \omega}\left(T_{\text{п}} + \frac{c_1 c_2 \omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}\right). \tag{11}$$

В данном уравнении угловая жесткость ПФМ:

$$\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}} t_{\text{с}} = \frac{\pi}{2} + 2\pi n.$$

Значение можно получить в форме аналитического итога:

$$c_1` = \sqrt[3]{c^2{}_2(3c_2 - G) - \left(c_2 - \frac{G}{3}\right)^3 + \left\{\left[c^2{}_2 - \left(\frac{c_2}{3} - \frac{G}{9}\right)\right]^3 + \left[\left(c_2 - \frac{G}{3}\right)^3 - c^2{}_2\left(3c_2 - G\right)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}} +$$

$$+\sqrt[3]{c^2{}_2(3c_2 - G) - \left(c_2 - \frac{G}{3}\right)^3 - \left\{\left[c^2{}_2 - \left(\frac{c_2}{3} - \frac{G}{9}\right)\right]^3 + \left[\left(c_2 - \frac{G}{3}\right)^3 - c^2{}_2\left(3c_2 - G\right)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}} - c_2 + G.$$

В результате $G = J_2 c^2{}_2 \omega^2 \left(\pi/2 + 2\pi n - 1\right)^2 / T^2{}_{\text{п}1}$. Зная c_1 и $t_{\text{с}}$, найдем значения вращающих моментов, действующих на упругую связь 4. Для этого используем представленные ниже зависимости [6–9].

— Предохранительная фрикционная муфта (упругий вид):

$$T'_2 = T_{\text{п}1} + \frac{c_1 + c_2}{c_2} T_{\text{н}}. \tag{12}$$

— Предохранительная фрикционная муфта (жесткий вид):

$$T''_2 = T_{\text{п}1} + c_2 \omega \sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}. \tag{13}$$

По итогам выполненных вычислений необходимо сделать ряд замечаний. С увеличением c_2 сокращается значение момента, возникающего на упругой связи 4 (упругая муфта). Если c_2 растет, увеличивается и вращающий момент T''_2 (жесткая муфта).

Рассмотрим типы нагрузки привода. Важно учесть, что до срабатывания предохранительной фрикционной муфты перегрузка не является причиной остановки рабочих органов машины (рис. 2).

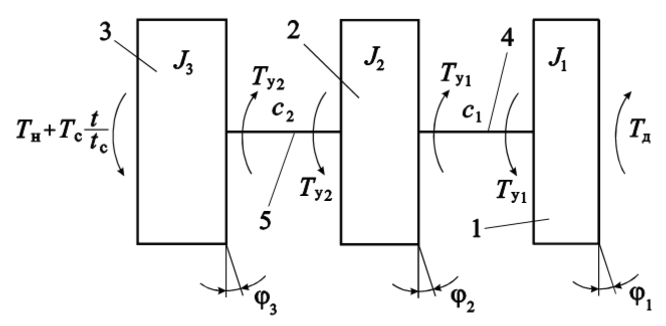


Рис. 2. Расчетная динамическая схема 2

Уравнения для данной системы:

$$J_1\ddot{\phi}_1 + c_1(\phi_1 - \phi_2) = T_{\text{д}}, \tag{14}$$

$$J_2\ddot{\phi}_2 - c_1(\phi_1 - \phi_2) + c_2(\phi_2 - \phi_3) = 0, \tag{15}$$

$$J_3\ddot{\phi}_3 - c_2(\phi_2 - \phi_3) = -T_{\text{н}} - T_{\text{с}}\frac{t}{t_{\text{с}}}. \tag{16}$$

Здесь ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 — обобщенные угловые координаты масс инерции 1, 2 и 3; $T_{\text{с}}$ — значение возможного роста вращающего момента в устройстве рабочего органа; $t_{\text{с}}$ —время (связано со значением скорости роста перегрузки и $T_{\text{с}}$). Значение вращающего момента $T_{\text{с}}$ (зависит от типа технологической машины и возможностей ее применения) записывается в виде: $(1,2...4)T_{\text{н}}$ [10–13]. Рабочий орган имеет резерв мощности, и значение угловой скорости масс инерции 1 принято неизменным, т. е. $\phi_1 = \omega t$. В этом случае, учитывая (16), получим [13]:

$$c_1(\phi_1 - \phi_2) = T_{\text{д}}.$$

Выполним суммирование:

$$J_2\ddot{\phi}_2 + (c_1 + c_2)\phi_2 - c_1\omega t - c_2\phi_3 = 0. \tag{17}$$

Суммируем (15) и (16):

$$J_2\ddot{\phi}_2 - c_1\omega t + c_1\phi_2 + J_3\ddot{\phi}_3 = -T_{\text{н}} - T_{\text{с}}\frac{t}{t_{\text{с}}}. \tag{18}$$

Дважды дифференцируем (16):

$$J_2\frac{d^4\phi_2}{dt^4} + (c_1 + c_2)\frac{d^2\phi_2}{dt^2} - c_2\frac{d^2\phi_3}{dt^2} = 0. \tag{19}$$

Используя (18), получим:

$$\frac{d^2\phi_3}{dt^2} = \frac{1}{J_3}\left(c_1\omega t - c_1\phi_2 - T_{\text{н}} - T_{\text{с}}\frac{t}{t_{\text{с}}}\right) - \frac{J_2}{J_3}\frac{d^2\phi_2}{dt^2}.$$

Подставим последнее выражение в (16):

$$\frac{d^4\phi_2}{dt^4} + \frac{c_2J_2 + (c_1 + c_2)J_3}{J_2J_3}\frac{d^2\phi_2}{dt^2} + \frac{c_1c_2}{J_2J_3}\phi_2 = \frac{c_2}{J_2J_3}\left(c_1\omega t - T_{\text{н}} - T_{\text{с}}\frac{t}{t_{\text{с}}}\right). \tag{20}$$

Из (20) находим:

$$\phi_2 = \frac{1}{c_2}\left(J_3\frac{d^2\phi_3}{dt^2} + c_2\phi_3 + T_{\text{н}} + T_{\text{с}}\frac{t}{t_{\text{с}}}\right). \tag{21}$$

Дважды дифференцируя (21), получим:

$$\frac{d^2\phi_2}{dt^2} = \frac{1}{c_2}\left(J_3\frac{d^4\phi_3}{dt^4} + c_2\frac{d^2\phi_3}{dt^2}\right). \tag{22}$$

Подставим (22) и (21) в (18):

$$\frac{d^4\phi_3}{dt^4} + \frac{c_2J_2 + (c_1 + c_2)J_3}{J_2J_3}\frac{d^2\phi_3}{dt^2} + \frac{c_1c_2}{J_2J_3}\phi_3 = \frac{c_2}{J_2J_3}\left[c_1\omega t - \frac{c_1 + c_2}{c_2}\left(T_{\text{н}} + T_{\text{с}}\frac{t}{t_{\text{с}}}\right)\right]. \tag{23}$$

Запишем общие решения уравнений (22) и (23):

$$\phi_2 = A_1\sin k_1t + B_1\cos k_1t + C_1\sin k_2t + D_1\cos k_2t + \frac{1}{c_1}\left(c_1\omega t - T_{\text{н}} - T_{\text{с}}\frac{t}{t_{\text{с}}}\right), \tag{24}$$

$$\varphi_3 = A_2\sin k_1t + B_2\cos k_1t + C_2\sin k_2t + D_2\cos k_2t + \frac{1}{c_1 + c_2}\left[c_1\omega t - \frac{c_1 + c_2}{c_2}\left(T_{\text{н}} + T_{\text{с}}\frac{t}{t_{\text{с}}}\right)\right]. \tag{25}$$

Здесь

$$k_{1,2} = \sqrt{\frac{c_2J_2 + (c_1 + c_2)J_3}{2J_2J_3} \pm \sqrt{\left[\frac{c_2J_2 + (c_1 + c_2)J_3}{2J_2J_3}\right]^2 - \frac{c_1c_2}{J_2J_3}}}.$$

Результаты исследования. Используя выражения (22) и (23), найдем значения нагрузки, возникающей в упругих связях, не представленных в (18). В этом случае используем значения движущего момента $T_д$, равного $(\phi_1-\phi_2)(t)$. Наличие момента $T_н$ позволяет записать обобщенные координаты: $\phi_1-\phi_2=T_н/c_1$, $\phi_2-\phi_3=T_н/c_2$, $\phi_1=\omega t$. Опишем условия старта при увеличении нагрузки (от начальных показателей): при $t=0$ $\phi_2=-T_н/c_1$, $d\phi_2/dt=\omega$; $\phi_3=-(c_1+c_2)T_н/c_1c_2$, $d\phi_3/dt=\omega$. Учитывая (17) и (18) и стартовые условия, получим (при $t=0$):

$$\frac{d^2\phi_2}{dt^2}=-\frac{c_2}{J_2c_1}T_н;\ \frac{d^3\phi_2}{dt^3}=0;\ \frac{d^2\phi_3}{dt^2}=\frac{c_2-2c_1}{J_3c_1}T_н;\ \frac{d^3\phi_3}{dt^3}=0.$$

Используем стартовые условия, полученные показатели и основные выражения (22) и (23). Получим значения постоянных процесса интегрирования:

$$A_1=-\frac{k^2{}_2T_с}{k_1(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1t_с};\ B_1=\frac{T_нc_2}{c_1J_2(k^2{}_1-k^2{}_2)};$$

$$C_1=\frac{k^2{}_1T_с}{k_2(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1t_с};\ D_1=-\frac{T_нc_2}{c_1J_2(k^2{}_1-k^2{}_2)};$$

$$A_2=-\frac{k^2{}_2}{k_1(k^2{}_1-k^2{}_2)}\times\frac{(c_1+c_2)T_с}{c_1c_2t_с};\ B_2=-\frac{T_н(c_2-2c_1)}{c_1J_3(k^2{}_1-k^2{}_2)};$$

$$C_2=\frac{k^2{}_1}{k_2(k^2{}_1-k^2{}_2)}\times\frac{(c_1+c_2)T_с}{c_1c_2t_с};\ D_2=\frac{T_н(c_2-2c_1)}{c_1J_3(k^2{}_1-k^2{}_2)}.$$

Подставим значения, полученные после интегрирования, в (22) и (23):

$$\phi_2=\frac{1}{(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1}\left[\frac{T_с}{t_с}\left(\frac{k^2{}_1}{k_2}\sin k_2t-\frac{k^2{}_2}{k_1}\sin k_1t\right)+\right.$$
$$\left.+\frac{T_нc_2}{J_2}(\cos k_1t-\cos k_2t)\right]+\frac{1}{c_1}\left(c_1\omega t-T_н-T_с\frac{t}{t_с}\right);$$

$$\varphi_3=\frac{1}{(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1}\left[\frac{(c_1+c_2)T_с}{c_2t_с}\left(\frac{k^2{}_1}{k_2}\sin k_2t-\frac{k^2{}_2}{k_1}\sin k_1t\right)+\right.$$
$$\left.+\frac{(c_2-2c_1)T_н}{J_3}(\cos k_2t-\cos k_1t)\right]+\frac{1}{c_1+c_2}\left[c_1\omega t-\frac{c_1+c_2}{c_2}\left(T_н+T_с\frac{t}{t_с}\right)\right].$$

Значения вращающих моментов, воспринимаемых упругими связями 4 и 5:

$$T_1=(\phi_1-\phi_2)c_1=\frac{1}{k^2{}_1-k^2{}_2}\left[\frac{T_с}{t_с}\left(\frac{k^2{}_2}{k_1}\sin k_1t-\frac{k^2{}_1}{k_2}\sin k_2t\right)-\right.$$
$$\left.-\frac{T_нc_2}{J_2}(\cos k_1t-\cos k_2t)\right]+T_н+T_с\frac{t}{t_с}; \quad (26)$$

$$T_2=(\phi_2-\phi_3)c_2=\frac{c_2}{(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1}\left[T_н\left(\frac{c_2}{J_2}+\frac{c_2-2c_1}{J_3}\right)(\cos k_1t-\cos k_2t)-\right.$$
$$\left.-\frac{T_сc_1}{c_2t_с}\left(\frac{k^2{}_1}{k_2}\sin k_2t-\frac{k^2{}_2}{k_1}\sin k_1t\right)\right]+\frac{c^2{}_2}{c_1+c_2}\omega t+\frac{c_1-c_2}{c_1}\left(T_н+T_с\frac{t}{t_с}\right). \quad (27)$$

Значения k_1t и k_2t не связаны друг с другом. Значения $\sin k_1t$, $\sin k_2t$, $\cos k_1t$, $\cos k_2t$ могут быть положительными или отрицательными: $\sin k_1t=1$ и $\sin k_2t=-1$ или $\cos k_1t=-1$ и $\cos k_2t=1$ [10–12]. Значения этих временных промежутков находятся из (27):

$$t_1=(T_п-T_н)\frac{t_с}{T_с}-\frac{k^3{}_1+k^3{}_2}{k_1k_2(k^2{}_1-k^2{}_2)}, \quad (28)$$

$$t_2=\frac{t_с}{T_с}\left\{T_п-\left[\frac{2c_2}{(k^2{}_1-k^2{}_2)J_2}+1\right]T_н\right\}. \quad (29)$$

Подставив (27) и (28) в (29), получим значения взаимосвязанных вращающих моментов в упругой связи 5 [13]:

$$T'_2 = \frac{(k^3{}_1 + k^3{}_2)c_2}{k_1 k_2 (k^2{}_1 - k^2{}_2)}\left(\frac{T_{\text{с}}}{c_1 t_{\text{с}}} - \frac{c_2\omega}{c_1 + c_2}\right) + (T_{\text{п}} - T_{\text{н}})\frac{t_{\text{с}}}{T_{\text{с}}}\left[\frac{c^2{}_2\omega}{c_1 + c_2} + \frac{(c_1 - c_2)T_{\text{с}}}{c_1 t_{\text{с}}}\right] + \frac{c_1 - c_2}{c_1}T_{\text{н}}, \quad (30)$$

$$\begin{gathered} T''_2 = \frac{t_{\text{с}}}{T_{\text{с}}}\left\{T_{\text{п}} - \left[1 + \frac{2c_2}{(k^2{}_1 - k^2{}_2)J_2}\right]T_{\text{н}}\right\}\left[\frac{c^2{}_2\omega}{c_1 + c_2} + \frac{(c_1 - c_2)T_{\text{с}}}{c_1 t_{\text{с}}}\right] + \\ + T_{\text{н}}\left[\frac{c_1 - c_2}{c_1} - \frac{2c_2}{(k^2{}_1 - k^2{}_2)c_1}\left(\frac{c_2}{J_2} + \frac{c_2 - 2c_1}{J_3}\right)\right]. \end{gathered} \quad (31)$$

Используем выражение для вычисления распорной силы [13], чтобы получить максимальное значение вращающего момента, который передает предохранительная фрикционная муфта при увеличении наружного момента до T_i :

$$F_{\text{р}} = \frac{T_i - T'_2}{r}\,\text{tg}\alpha\,.$$

Используем это выражение, чтобы найти вращающий момент T'_2 :

$$T'_2 = R_{\text{ср}} f_i \left(F_{\text{п}} - \frac{T_i - T'_2}{r}\,\text{tg}\alpha\right).$$

Учтем значение для полного вращающего момента $T_{\text{п}}$ ПФМ и получим $T_{\text{п}} = T_i$. Таким образом, к окончанию 2-го временного отрезка $t_1 \ldots\ t_2$, когда завершается распределение нагрузки в предохранительной фрикционной муфте, оказываются одинаковыми значения момента трения и наружного вращающего момента.

Обсуждение и заключения. Найдена зависимость для вычисления минимального числа пар трения основной фрикционной группы. Показано, что при этом минимуме коэффициент усиления, используемый для реализации «идеальной» нагрузочной характеристики ПФМ, не превышает предельно допустимое значение, даже если величина коэффициента трения максимальна. Представлена принципиальная модель ПФМ, в которой при минимальном значении коэффициента трения отрицательная обратная связь не действует. В принципиальной схеме модернизации базового варианта ПФМ для повышения точности срабатывания и номинальной нагрузочной способности отсутствует отрицательная обратная связь при минимальном значении коэффициента трения.

Библиографический список

1. Брауде, В. И. Системные методы расчета грузоподъемных машин / В. И. Брауде, М. С. Тер-Мхитаров. — Ленинград : Машиностроение, 1985. — С. 181–205.

2. Кочаев, В. П. Расчеты деталей машин конструкций на прочность и долговечность / В. П. Кочаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. — Москва : Машиностроение, 1985. — 224 с.

3. Афанасьев, М. К. Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки : автореф. дис ... канд. техн. наук / М. К. Афанасьев. — Киев, 1971. — 21 с.

4. Муфты повышенной точности ограничения нагрузки / Я. И. Есипенко [и др.]. — Киев : Техніка, 1972. — С. 168–175.

5. Запорожченко, Р. М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания / Р. М. Запорожченко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 1971. — № 1. — С. 48–52.

6. Запорожченко, Р. М. К вопросу об эффективности фрикционных предохранительных муфт с точки зрения снижения веса приводов / Р. М. Запорожченко // Вестник Харьков. политехн. ин-та. — 1971. — Вып. I.XIV, № 58. — С. 16–19.

7. Шишкарев, М. П. Исследование точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт с комбинированной обратной связью (часть 2) [Электронный ресурс] / М. П. Шишкарев, К. О. Кобзев // Науковедение. — 2013. — № 4 (17). — Режим доступа : http://naukovedenie.ru/PDF/03tvn413.pdf (дата обращения : 28.10.2019).

8. Шишкарев, М. П. Синтез принципиальной схемы модернизированного варианта адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью [Электронный ресурс] / М. П. Шишкарев, К. О. Кобзев // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 2. — Режим доступа : http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1738 (дата обращения : 28.10.2019).

9. Шишкарев, М. П. Элементы теории отрицательно-нулевой обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах / М. П. Шишкарев, К. О. Кобзев // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2014. — № 1. — С. 180–191.

10. Основы методологии расчета и проектирования адаптивных фрикционных муфт с раздельным силовым замыканием [Электронный ресурс] / М. П. Шишкарев [и др.] // Науковедение. — 2013. — № 5. — Режим доступа : http://www.naukovedenie.ru/PDF/17tvn513.pdf (дата обращения : 28.10.2019).

11. Специфика методик расчета и проектирования адаптивных фрикционных муфт с раздельным силовым замыканием [Электронный ресурс] / М. П. Шишкарев [и др.] // Науковедение. — 2013. — № 5. — Режим доступа : http://www.naukovedenie.ru/PDF/18tvn513.pdf (дата обращения : 28.10.2019).

12. Clutch adjustment mechanism : patent [Электронный ресурс] / J. M. Chapman, T. C. Mounce ; Ace Mfg & Parts Co // Justia patents. — Режим доступа : https://patents.justia.com/patent/8047351#history (дата обращения : 28.10.2019).

13. Lubrication controlling method for starling clutch : patent [Электронный ресурс] / Tomoyuki Miyazaki [et al.] ; NSK-Warner K. K. // patents.google.com. — Режим доступа : https://patents.google.com/patent/US8037990 (дата обращения : 28.10.2019).

Сдана в редакцию 16.09.2019
Принята к публикации 15.11.2019

Об авторе:

Кобзев Кирилл Олегович,
доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5633-3352
5976765@mail.ru